

Adrianna Nidzgorska*, Jerzy Perczyński, Marek Chalimoniuk, Artur Kułasza
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Diagnozowanie uszkodzeń BVID w materiałach kompozytowych metodą tomografii komputerowej (CT)

BVID damage diagnosis in composite materials using computed tomography (CT) method

STRESZCZENIE

Uszkodzenia BVID (ang. Barely Visible Impact Damage) w polimerowych materiałach kompozytowych elementów konstrukcji lotniczych pojawiają się w wyniku oddziaływania na nie dynamicznych obciążeń ciał obcych (FOD - ang. Foreign Object Damage), takich jak np. narzędzia, grad, kamienie itp., o małych prędkościach i niewielkich energiach. Uszkodzenia tego typu można zaliczyć zarówno do grupy uszkodzeń eksploatacyjnych jak i produkcyjnych. Z punktu widzenia eksploatacji są one szczególnie niebezpieczne, ponieważ charakteryzują się słabą wykrywalnością powszechnie stosowanymi metodami diagnostycznymi np. metodą wizualną, jednocześnie propagując wewnątrz materiału. Tomografia komputerowa (CT - ang. Computed Tomography) jest rodzajem tomografii rentgenowskiej pozwalającym na uzyskanie obrazów przestrzennych (3D) z prześwietlenia badanego obiektu wykonanych z różnych kierunków. Umożliwia ona wykrycie nieciągłości materiału oraz wiarygodną ocenę badanych elementów. Z tego powodu metoda ta znalazła zastosowanie do skutecznej weryfikacji uszkodzeń typu BVID na wczesnym ich etapie, wpływając w znacznym stopniu na bezpieczeństwo eksploatacji.

Słowa kluczowe: kompozyt, badania tomograficzne, uszkodzenia BVID.

ABSTRACT

Damages type Barely Visible Impact Damage (BVID) in polymer composite materials of airborne construction elements occur as a result of dynamic loads interaction caused by Foreign Object Damage (FOD) such as tools, hail, stones etc. with low velocities and energies. There are both exploitation and production type of BVID damages. They are especially dangerous from exploitation point of view because they are characterized by insufficient visual detectability while using common methods like visual method, but they spread into the material at the same time. Computed tomography (CT) is a type of X-ray tomography that allows to get 3D pictures from scanning examined object from different directions. It enables for detecting material discontinuities and reliable assessment of the researched elements. For this reason CT method has been used in effective BVID damages verification in their early stage and has an enormous influence on the exploitation safety.

Keywords: composite, tomographic research, barely visible impact damage.

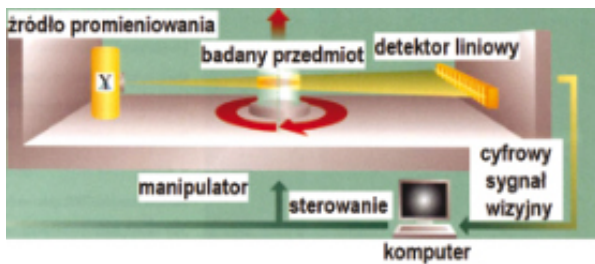
1. Wstęp

W diagnostyce technicznej szerokie zastosowanie znalazła metoda tomografii komputerowej (CT). Jest ona rodzajem tomografii rentgenowskiej, pozwalającym na uzyskanie obrazów przestrzennych (3D) z prześwietlenia badanego obiektu wykonanych z różnych kierunków. Urządzenie do CT nazywamy tomografem, a uzyskany obraz tomogramem. W przypadku badania z wykorzystaniem detektora liniowego wiązka promieniowania przy użyciu przesłony kształtowana jest do wiązki płaskiej i odbierana przez szereg czujników. Obrót przedmiotu o 360° umożliwia otrzymanie płaskiego obrazu plastra, natomiast obraz przestrzenny 3D uzyskuje się poprzez dodatkowe przemieszczanie detalu w płaszczyźnie pionowej. Dane zgromadzone w formie cyfrowych sygnałów wizyjnych przesyłane są do komputera w celu otrzymania pełnego obrazu 3D [1]. Zasadę tworzenia obrazu przedstawia rysunek 1. W będącym na wyposażeniu

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych tomografie GE typu v/tome/x m 300 (Rys. 2) promienie rentgenowskie generowane przez lampę w postaci wiązki stożkowej przenikają przez próbkę i padają na detektor panelowy. Przestrzenny obraz powstaje w wyniku jednego obrotu badanego przedmiotu. Tomograf posiada dwie lampy. W lampie, w której panuje próżnia, elektrony są emitowane z podgrzewanego włókna w kierunku anody. Przez anodę elektrony wpadają do soczewki magnetycznej, która skupia wiązkę elektronów do małej plamki na tarczy. Tarcza składa się z cienkiej warstwy wolframu naniesionej na płytę z metalu lekkiego, która stanowi również okno wyjściowe dla promieniowania rentgenowskiego (lampa transmisyjna 180 kV) lub stanowi masywny cylinder wolframowy (lampa kierunkowa 300 kV) [2]. Urządzenie to pozwala na przeprowadzanie badań z bardzo dużym powiększeniem i rozdzielczością. Powiększenie całkowite, zależne jest od wymiarów badanego obiektu oraz detektora i wynosi maksymalnie 160x a osiągnięta rozpoznawalność szczegółów kształtuje się na poziomie 0,4 μm [3].

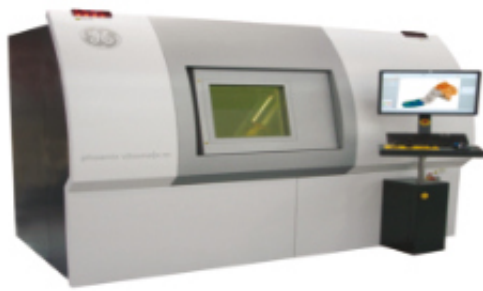
*Autor korespondencyjny.

E-mail: adrianna.nidzgorska@itwl.pl



Rys. 1. Schemat badania tomograficznego z detektorem liniowym [1].

Fig. 1. Diagram of tomographic research with line detector [1].



Rys. 2. Tomograf v/tome/x/m 300 z firmy GE [3].

Fig. 2. V/tome/x/m/300 CT scanner from GE company [3].

2. Zastosowanie tomografii komputerowej

Tomografia komputerowa (CT) posiada szerokie spektrum zastosowania w wielu dziedzinach nauki. W przemyśle lotniczym wykorzystywana jest do diagnozowania elementów konstrukcji statku powietrznego. Dzięki niej możemy np. dokonać oceny jakości połączeń spawanych lub określić stan łopatek wirnikowych. W przypadku łopatek sprężarkowych i turbinowych metodą tomografii można stosować do sprawdzania całej partii łopatek, a nie jak dotychczas reprezentatywnej próbki z danej partii. Metoda ta pozwala na weryfikację wad i uszkodzeń wewnątrz materiału. Umożliwia uzyskanie obrazów przestrzennych stanu wewnętrznego obiektów badań w krótkim czasie i z dużą wiarygodnością. Jedną z największych zalet tomografii komputerowej jest możliwość diagnozowania agregatów bez konieczności ich wcześniejszego demontażu [1].

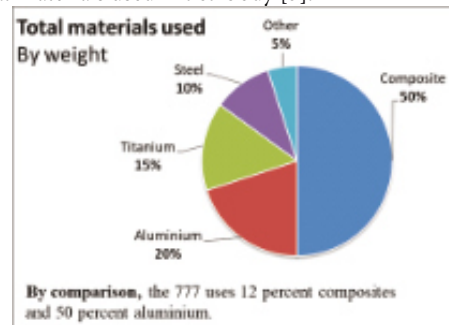
Szczególną uwagę z punktu widzenia diagnostyki oraz bezpieczeństwa eksploatacji techniki lotniczej należy zwrócić na materiały kompozytowe, które stanowią grupę powszechnie stosowanych materiałów ze względu na swą dużą wytrzymałość przy relatywnie niskiej masie. Kompozyt jest tworzywem wielo-materiałowym. Materiały, z których zbudowany jest kompozyt, posiadają różne cechy, ale po połączeniu wykazują dużo lepsze właściwości niż każdy z nich osobno. Jeden z komponentów stanowi osnowę (inaczej matrycę) i odpowiada za spójność, twardość i elastyczność kompozytu (zazwyczaj bardziej plastyczny i miękki). Drugi zaś jest wzmocnieniem (inaczej zbrojeniem) i zapewnia właściwości mechaniczne takie jak odporność na ściskanie i rozciąganie (z reguły twardszy i bardziej kruchy).

Rozróżniamy następujące rodzaje włókien stosowanych w celu wzmocnienia struktur kompozytowych: szklane



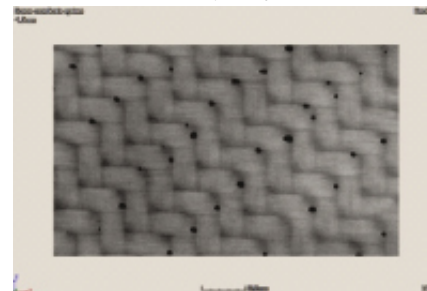
Rys. 3a. Materiały użyte w konstrukcji Boeinga 787 [5].

Fig. 3a. Materials used in 787 body [5].



Rys. 3b. Masowy udział materiałów użytych w konstrukcji Boeinga 787 Dreamliner [5].

Fig. 3b. Total materials used by weight [5].



Rys. 4. Tomogram materiału kompozytowego z wadami produkcyjnymi w postaci porowatości [8].

Fig. 4. Tomogram of composite material with production defect in the form of porosity [8].

G (Glass), węglowe C (Carbon) oraz aramidowe A (Aramid). W konstrukcjach lotniczych nowej generacji najczęściej stosuje się kompozyty wzmocnione włóknami szklanymi (GFRP) oraz włóknami węglowymi (CFRP).

Procentowy udział materiałów kompozytowych w konstrukcjach lotniczych wykazuje tendencję wzrostową. W przypadku samolotu Boeing 787 Dreamliner udział masy kompozytów wynosi aż 50%, a udział objętościowy 80% (Rys. 3a, Rys. 3b). Odpowiada to współczesnym wymaganiom stawianym przed operatorami lotniczymi w zakresie ochrony środowiska oraz stanowi istotny czynnik zmniejszający koszty operacji lotniczych [4]. Wprowadzenie do przemysłu lotniczego materiałów kompozytowych wymusiło jednocześnie podjęcie prac mających na celu określenie kryteriów oceny ich stanu oraz metod diagnostycznych zarówno na etapie produkcji jak i w eksploatacji. Na rys. 4 przedstawiono nieznacznych rozmiarów wady materiału kompozytowego, mające postać porów powietrznych.



Rys. 5. Zderzenie samolotu pasażerskiego typu ATR-72 ze stadem ptaków [7].

Fig. 5. ATR-72 passenger plane crash with a flock of birds [7].



Rys. 6. Uszkodzenie sprężarki silnika odrzutowego [8].

Fig. 6. Damage of jet engine compressor [8].

3. Przyczyny i skutki zdarzeń uderowych

Wskutek oddziaływania elementów FOD o małych prędkościach i niewielkich energiach, w polimerowych materiałach kompozytowych elementów konstrukcji lotniczych powstają uszkodzenia typu BVID. Uszkodzenia te są niebezpieczne z punktu widzenia eksploatacji, ponieważ charakteryzują się słabą wykrywalnością wizualną, propagując jednocześnie wewnątrz materiału powodując nieciągłości takie jak pęknięcia czy rozwarstwienia.

Do najbardziej powszechnych zagrożeń definiowanych jako BVID należą: zderzenia z ptakami, upadki narzędzi, upuszczone części, uderzenia kamieni i gradu oraz tzw. ruch pieszy (związany z przemieszczaniem się po strukturze statku powietrznego ludzi).

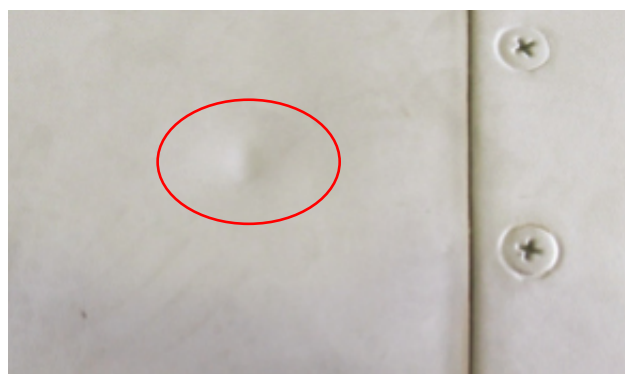
Zderzenia z ptakami niosą istotne ryzyko dla operacji lotniczych. Do kolizji samolotu z ptakami najczęściej dochodzi w trakcie operacji lotniczych związanych ze startem, odlotem z lotniska i podejściem do lądowania [6]. Uszkodzeniom wywołanym przez zderzenia z ptakami najczęściej ulegają kompozytowe poszycie płatowca (rys. 5) i wlotowe podzespoły kanału przepływowego silnika (rys. 6).

Przykładowe obrazy eksploatacyjnych uszkodzeń powierzchni materiałów kompozytowych spowodowanych prawdopodobnie przez upadki narzędzi lub części



Rys. 7a. Uszkodzenie eksploatacyjne poszycia SP [8].

Fig. 7a. Exploitative damage of an aircraft skin [8].



Rys. 7b. Uszkodzenie eksploatacyjne poszycia SP [8].

Fig. 7b. Exploitative damage of an aircraft skin [8].

Tab. 1 Przykładowe energie uderzenia dla różnych obiektów upadających na strukturę [9].

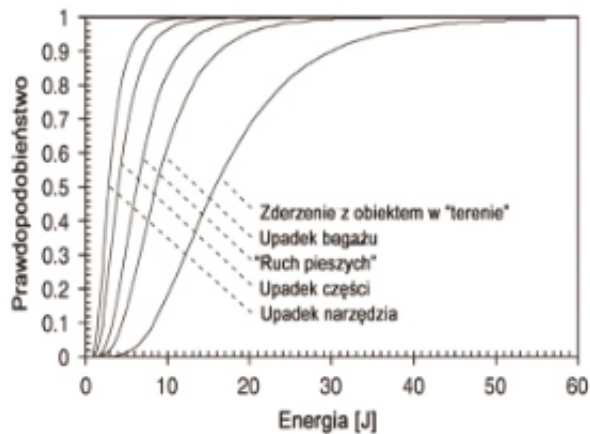
Tab. 1 Exemplary impact energies for different objects falling on the structure [9].

Narzędzie upuszczone	Energia [J]
Suwmiarka	3
Grzechotka	4,1
Mały młotek	6
Wkrętak	7,1
Klucz płaski	10
Elektronarzędzia	24,9

przedstawione zostały na rys. 7a i rys. 7b.

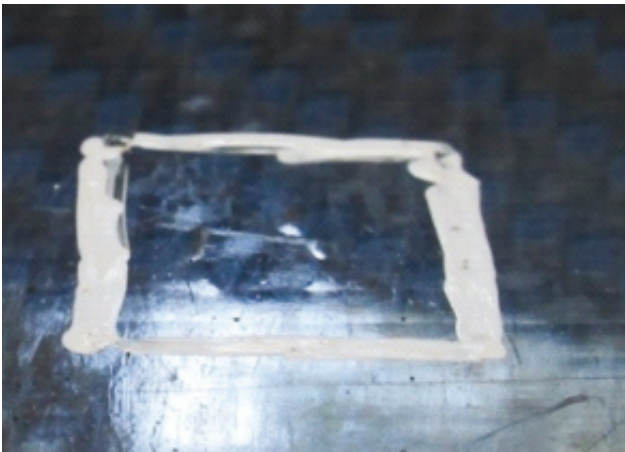
Energia uderzenia upuszczanych narzędzi mieści się w przedziale od 3 J do 25 J (Tab. 1). Na wartość energii ma wpływ między innymi wysokość, z której dany przedmiot może zostać upuszczony, oraz jego ciężar i kształt.

Uderzenia występujące w warunkach terenowych generują najwyższe energie uderzenia (ok. 60J). Podobne wartości energii obserwujemy przy oddziaływaniu sprzętu lotniskowego na statek powietrzny. Rysunek 8 przedstawia rozkłady prawdopodobieństwa energii uderzeń eksploatacyjnych dla poszczególnych rodzajów zagrożeń z grupy BVID.



Rys. 8. Prawdopodobieństwo wystąpienia różnych zagrożeń spowodowanych obciążeniem dynamicznym w funkcji energii uderzenia [9].

Fig. 8. Probability of occurring different dangers caused by dynamic load in function of impact energy [9].



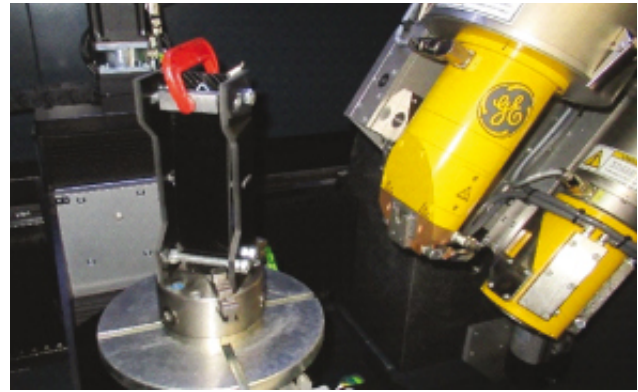
Rys. 9a. Wgniecenie na płycce kompozytowej o grubości 7,3 mm po uderzeniu o energii 20 J [8].

Fig. 9a. Dent in composite specimen after impact with an energy of 20 J [8].



Rys. 9b. Wgniecenie na płycce kompozytowej o grubości 7,3 mm po uderzeniu o energii 30 J [8]

Fig. 9b. Dent in composite specimen after impact with an energy of 30 J [8].



Rys. 10. Widok przedmiotu w trakcie badania.

Fig. 10. The view of the object during research.

4. Badania płytki kompozytowej typu CFRP

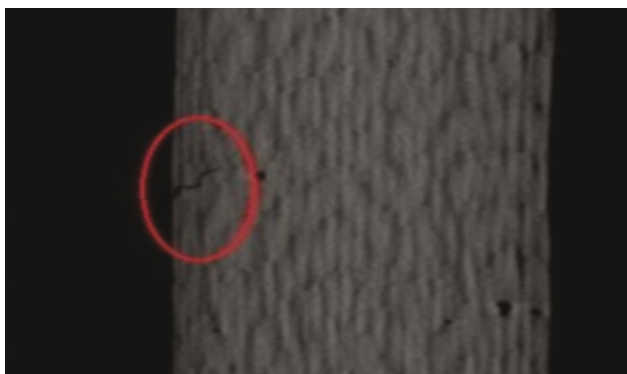
Powszechnie wiadomo, że elementy (materiały kompozytowe) użyte do budowy statków powietrznych podlegają znacznym obciążeniom i narażone są na różnego typu defekty. Należy tu zaznaczyć, że badania wizualne uszkodzonych elementów płatowca mogą pierwotnie nie wykazywać cech destrukcyjnych, jednak poddane badaniom tomograficznym ujawniają realne wady materiału. Ten fakt sprawia, że konieczne jest wykonywanie regularnych badań diagnostycznych w celu wczesnego wykrycia uszkodzeń, np. typu BVID, które mogą stanowić poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa operacji lotniczych.

W związku z powyższym, w celu określenia wpływu uderzenia w elementy wykonane z materiałów kompozytowych przez ciała obce o różnej energii oraz powstających w wyniku tego uszkodzeń, przeprowadzono badania symulacyjne. W warunkach laboratoryjnych zbadano fragmenty trzech płytek kompozytowych typu CFRP o wymiarach 60 x 250 x 7,3 mm, które poddano uderzeniu o niskiej energii (zakres 10 J ÷ 30 J). Badania wykonywano z wykorzystaniem młota udarowego firmy Instron model Ceast9340.

Płytkę kompozytową poddaną obciążeniu udarowemu o energii 10 J nie wykazała cech uszkodzenia, inaczej niż płytki obciążone udarowo energią - odpowiednio 20 J i 30 J z widocznym defektem w postaci wgniecenia powierzchni (rys. 9a oraz rys. 9b).

W celu wykrycia nieciągłości wewnątrz materiału zastosowano metodę tomografii komputerowej (CT), wykorzystując urządzenie typu v/tome/x/m/300. Badane elementy po wcześniejszym poddaniu ich obciążeniom udarowym, umieszczono w kabinie rentgenowskiej (rys. 10).

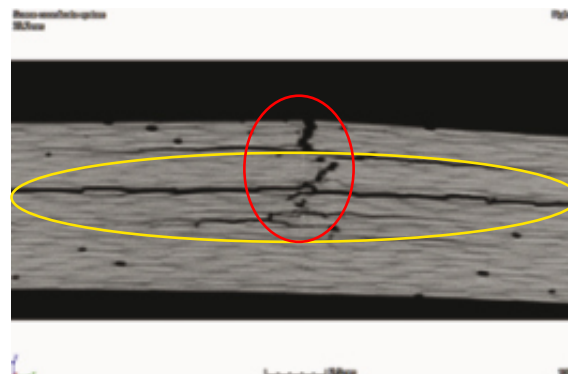
Przeprowadzone badania, na podstawie uzyskanych tomogramów wykazały, że jedynie płytki kompozytowe poddane obciążeniom dynamicznym w zakresie energii 20 J ÷ 30 J posiadają pęknięcia i rozwarstwienia wewnętrznej struktury materiału kompozytowego (rys. 11a i rys. 11b). Pomimo mało widocznych uszkodzeń na powierzchni elementu kompozytowego, jego struktura wewnętrzna uległa uszkodzeniu w stopniu mogącym mieć wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji.



○ Obszar pęknięć

Rys. 11a. Tomogram materiału kompozytowego z widocznymi pęknięciami i delaminacjami po obciążeniu 20J [8].

Fig. 11a. Tomogram of composite material with visible cracks and delaminations after impact with an energy of 20J [8].



○ Obszar delaminacji

Rys. 11b. Tomogram materiału kompozytowego z widocznymi pęknięciami i delaminacjami po obciążeniu 30J [8].

Fig. 11b. Tomogram of composite material with visible cracks and delaminations after impact with an energy of 30J [8].

5. Podsumowanie

W wyniku badania porównano uszkodzenia dla płytek kompozytowych typu CFRP, które powstały w wyniku poddania ich obciążeniom uderowym o energiach od 10 J do 30 J. W wyniku analizy obrazów powierzchni badanych materiałów oraz uzyskanych tomogramów zaobserwowano wzrost pola powierzchni uszkodzeń wraz ze wzrostem energii uderzenia.

W praktyce obsługowej statków powietrznych często dochodzi do uszkodzeń materiałów kompozytowych typu BVID. W procesie eksploatacji samolotu występują przypadkowe uszkodzenia o dynamicznym charakterze. Jest to istotny argument, który powinien być uwzględniany w procesie projektowania materiałów kompozytowych do wykorzystania w konstrukcji statku powietrznego. Uszkodzenia niskoenergetyczne BVID stanowią najbardziej krytyczny rodzaj uszkodzeń spośród tych, które nie są wykrywalne wizualnie. Stosowanie odpowiednich technik wykrywania (tomografia komputerowa CT) umożliwia wykorzystanie materiałów kompozytowych w fazie projektowej, biorąc pod uwagę potencjalne obciążenie eksploatacyjne dla elementów kompozytowych z uszkodzeniami BVID. Uzyskane w efekcie przeprowadzonych badań wyniki wykorzystano w pracach mających na celu opracowanie kryteriów oceny wpływu uszkodzeń typu BVID na bezpieczną eksploatację kompozytowych elementów statku powietrznego oraz technologii ich napraw.

6. Literatura

- [1] A. Kułaszka, M. Chalimoniuk, M. Wieczorowski, D. Brzozowski, „Ocena wad i niezgodności spawalniczych metodą tomografii komputerowej CT” *Przegląd spawalnictwa*, vol. 87, pp. 31-34, 12/2015
- [2] www.ita-polska.com.pl/baza-wiedzy/tomografia-komputerowa
- [3] GE Sensing & Inspection Technologies GmbH 2010, Instrukcja obsługi - System kontroli rentgenowskiej v|tome|x m 300
- [4] R. Bielawski, W. Rządkowski, S. Augustyn, P. Pyrzanowski, „Nowoczesne materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych – wybrane problemy oraz kierunki rozwoju” *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 291, *Mechanika* 87, RUTMech, t. XXXII, z. 87 (3/15), lipiec-wrzesień 2015, s. 203-216
- [5] <https://kompozyty.net/kompozyty-lotnictwie-analiza-ryнку/>
- [6] J. Ćwiklak, H. Jafernik, „Bezpieczeństwo lotów w aspekcie kolizji statków powietrznych z ptakami zaistniałych w lotnictwie SZ RP”
- [7] www.standbynordic.com
- [8] materiał własny – Z34 ITWL
- [9] C. Kassapoglou, „Modeling the effect of damage in composite structures simplified approaches”, Wiley, United Kingdom, 2015